土木建筑工程信息技术
Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture

地铁盾构穿越京广线股道群控制措施及效果分析

张　恋[1]　刘宝林[2]

（1. 武汉地铁集团，武汉　430030；2. 华中科技大学土木学院工程管理研究所，武汉　430074）

【摘　要】研究目的：随着城市地铁建设日渐增多，地铁施工所面临的穿越各种既有运营线路的问题也随之增多。为了进一步了解盾构穿越既有运营线路的影响，本文根据某城市地铁施工实际情况，主要针对地铁盾构穿越既有铁路线时采取的各项控制措施，以及采取控制措施后各项变形情况进行分析。研究结论：地铁盾构穿越京广线股道群时，为减小对铁路运营的影响主要在于施工中采取的各种控制措施，本文通过本区间穿越期间对沉降进行分析，虽然在盾构穿越期间造成地表、轨枕、道床沉降量较大，但通过各种控制措施合理施工，确保了穿越期间铁路运营安全。

【关键词】盾构隧道；京广线；地铁施工；控制措施；监测
【中图分类号】U455.43　【文献标识码】A　【文章编号】1674－7461(2017)01－0106－07
【DOI】10.16670/j.cnki.cn11－5823/tu.2017.01.19

引言

随着城市建设的快速发展，为了能更好解决城市道路拥堵问题，地铁建设越来越重要。在地铁建设过程中，盾构施工面临的问题也越来越多，由于交通规划的多变性，地铁大多为后期建设工程，在施工过程中必然会存在在既有建构筑构筑物附近施工的实际问题。特别是盾构穿越既有铁路线，由于铁路线运营要求比较高，盾构穿越时引起较大变形易造成较大的风险。因而盾构在穿越[1]时应采取合理的控制措施减小对既有铁路线的影响，本文针对某城市地铁穿越京广线股道群时采取的那些相应控制措施[2]进行了解，以及采取措施后的相应变形情况进行分析；为类似工程提供有益参考。

1　工程概况

1.1　工程概况

某城市地铁区间隧道起讫里程为K25＋029.503～K26＋290.837，右线长链1.299m，右线长1 262.633m；左线长链2.922m，左线长1 258.412m；双线总长为2 521.045m。隧道埋深10.9～23.1m之间，区间线路间距为10.4～16.8m，区间纵坡呈“V”型，最大坡度为19.538‰，最小坡度2‰。区间左右线各有2段曲线，最小曲线半径均为350m。采用盾构法施工。

区间于K25＋495～K25＋595范围内下穿京广铁路等股道群，12股道（其中汉孝城际高架2股道在建、城际场京广上行联络线1股道在建）。现状股道均采用钢筋混凝土轨枕、碎石道床。区间与铁路交角约77°，下穿长度100m，区段线间距约10.2～10.7m，隧道顶覆土厚度约21.5～22.5m，下穿纵断面区段图如图1所示。

根据详细勘察地质资料，该区间隧道主要穿越地层为3－5淤泥质粉质黏土、粉土、粉砂互层，4－1粉细砂层。

1.2　区间下穿段铁路概况

区间下穿铁路群场区平整，路基填高约1.7～2.6m，排水设施良好，无路基病害，详情如下：

（1）京广汉口联络线上下行线为国家Ⅰ级重型铁路，设计时速上行线为100km/h、下行线为80

【作者简介】　张恋（1987－），女，助理工程师，硕士，主要从事地铁工程安全风险管理研究。

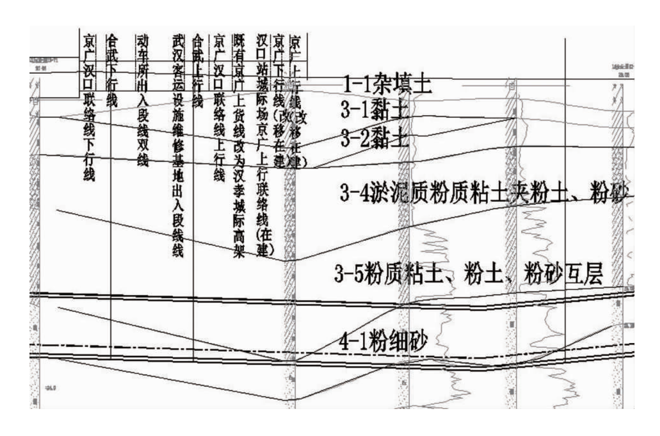


图 1 下穿铁路区段纵剖面图

km/h，上行线及下行线区间穿越地段均为路基，有碴道床。

(2)合武动车线为客运专线，紧邻京广铁路，线间距 5m，设计时速 250km/h，区间穿越地段上行线及下行线均为填方路基，有碴道床，地基采用搅拌桩加固，加固深度 4 ~6m。

(3)京广上下行线，设计时速为 100km/h，区间穿越地段上下行线两股道均为填方路基，有碴道床。

(4)动车所及维修基地出入线，区间穿越地段均为填方路基，有碴道床。

(5)隧道区间还将穿越规划在建铁路线 4 条，分别为汉孝城际线、汉口城际场京广联络线上行线、京广上行及下行线(改建)，其中汉孝城际线将由原京广上下行线路基改建，汉孝铁路在该区域以桥梁形式通过，地铁线路分别从 2、3 号墩以及 3、4 号墩之间穿过。汉孝特大桥采用桩基础，桩径 8 根直径 1m 的钻孔灌注桩，梅花型布置，桩长 44 ~46m，桩底持力层为强风化砾岩。其余 3 条均为路基，有砟道床。

2 盾构下穿铁路股道群施工方案

通过现场施工调查、调研、分析、计算，结合类似下穿国铁施工经验、国内其它城市区间盾构下穿国铁成功事例，吸取下穿国铁成功经验。同时结合设计方案 Peck 公式和三维数值计算对下穿铁路影响分析，均满足规范的要求。

穿越铁路主要采取地表注浆加固[3]、隔离桩保护、优化区间线路、加强管片设计、盾构掘进施工控制、洞内加固措施、列车限速、加强监控量测、施工技术保证措施等 8 个方面，对本区间下穿股道群及城际高架采取如下施工方案和保护措施，以确保下穿铁路施工安全。

2.1 优化盾构区间线路方案

区间初步设计线路纵断面采用单面坡，通过优化线路纵断面，采用“V”字型坡度，加大下穿铁路区段处隧道埋深，调整后隧道顶最小覆土厚度约 22.50m，比优化之前的纵断面埋深加大了 6.2m，且穿越地层较初步设计要好，可适当减小盾构穿越时土体的扰动，土体埋深增加了 6.2m 减缓了上部土体的沉降速率，穿越后及时采取补强注浆加固措施，有效控制地表沉降。

2.2 京广铁路股道群铁路袖阀管注浆加固施工

盾构穿越铁路股道群采用袖阀管注浆加固，共分 4 个区域进行加固。加固深度为 22.5m，其中空桩深度 16.5，实桩深度 6m。袖阀管加固平面布置图如图 2；袖阀管加固剖面布置图如图 3。

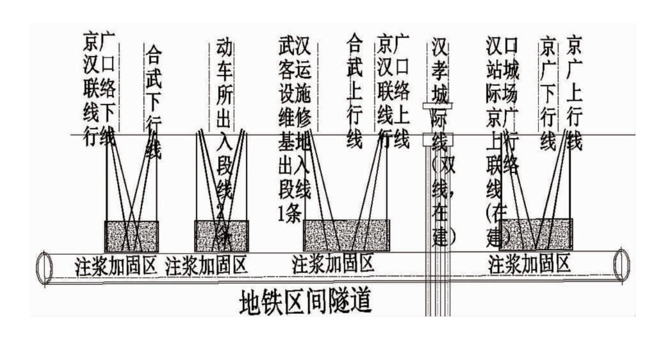


图 2 袖阀管注浆加固纵断面图

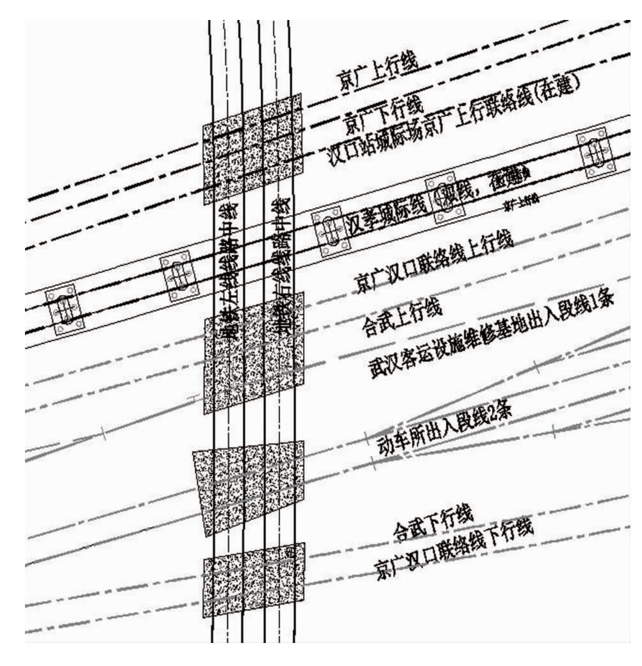


图 3 袖阀管注浆加固平面布置图

2.3 汉孝铁路桩基隔离桩施工方案

下穿汉孝城际桥梁桩基区段，采用 1000@1200mm 钻孔灌注桩隔离保护，钻孔桩与地铁区间隧道净距 1.5m，钻孔桩长度为承台中部至区间隧道结构底下方 3m，以减小盾构施工对桥梁桩基的影响。钻孔隔离桩应与城际桥桩同步施工。

2.4 盾构加强型管片方案

下穿铁路区段为里程左、右线 K25+495～K25+595，对里程区段 K25+470～K25+620 范围采用加强型衬砌管片，采用 E 型特殊加强管片。在邻接块和标准块各增加 4 个注浆孔，由原普通段每环管片 6 个注浆孔增至 16 个注浆孔，盾构穿越后用于地层全断面注浆加固，减小地面沉降。

2.5 京广股道群铁路线路架空加固施工方案

线路架空加固体系横梁(组)采用 I63c 工字钢。每两根轨枕间穿一根工字钢梁，等间距布置，作为纵梁支点的横梁组由 3 根 I63c 工字钢并列组成，间隙用硬木塞填密室。横梁跨度约 22～24m，从钢轨底穿过，横梁与钢轨间必须可靠绝缘。

纵梁采用双拼 I100 定型工便梁，安装在铁路外侧路肩位置并置于轨枕间伸出的横梁(组)上。

便梁基础采用桩径 1.0m 的挖孔桩，桩长 8m，桩顶做 1.0*1.0m 冠梁，对相邻线路场地狭小无条件分别做桩基础的地方考虑基础共用。

2.6 盾构过铁路掘进施工控制方案

本区间穿越京广线股道群主要从 13 个方面来控制盾构掘进；主要内容为：盾构机适应性分析；设置试验段；土压力控制；推进速度控制；出土量控制；盾构纠偏控制；管片拼装控制；严格控制浆液质量及注浆量；二次注浆辅以环箍注浆；全断面注浆加固；控制地层损失量控制；信息化施工；盾构机穿越前的检查、维修。

(1)盾构机适应性分析主要根据工程条件及工程地质特点选用辐板型刀盘，控制柜采用分布式 I/O 控制，主驱动系统采用电力驱动，配备 16 位推进油缸。

(2)设置试验段主要以通过盾构始发的前 100m 区段作为盾构施工试验段。在施工段不断调整施工参数，确定盾构穿越铁路的盾构推力、刀盘扭矩、土仓压力、注浆压力、掘进速度、出土量、渣土改良剂掺量、盾尾油脂量等施工参数，并推算出平均每日掘进环数，确定盾构穿越铁路的具体时间，并在穿越铁路群根据施工经验及理论计算值暂定盾构穿越铁路群轨掘进参数。

(3)土压力控制主要结合以往施工经验在轨道位置的土压力增加 10～15kPa；严格控制切口平衡土压力。

(4)推进速度控制主要为在穿越股道群时，盾构机推进速度建议控制在 2～4cm/分钟匀速前进，初步计划每天掘进 7 环；尽量做到均衡施工。

(5)出土量控制主要为严格实行“双控”制度，即出土体积和重量双控。

(6)盾构纠偏控制主要为在穿越铁路股道过程中，严禁大量纠偏，每班对对盾构司机、作业班组下达掘进指令，施工过程严格按照掘进指令进行，严禁私自调整参数，需进行纠偏，左右区域千斤顶力差及相邻两区域千斤顶力差不宜过大，防止盾构蛇形推进或者出现“犁地走”的情况，以此保证减小对土体的扰动，到达减小地面沉降的最终目的。

(7)管片拼装控制主要为正确选择 K 块管片定位，准确的选择拼装点位，回缩的千斤顶应尽可能的少。

(8)严格控制浆液质量及注浆量主要为盾构穿越铁路施工期间同步注浆要做到及时、均匀、足量，确保其建筑空隙得以及时和足量的充填。

(9)二次注浆辅以环箍注浆主要为在脱出盾尾的第 3 环～第 5 环管片，采用双液浆每间隔 5 环打好环箍，使隧道纵向形成间断的止水隔离带，再在各环箍间进行二次注浆，注浆顺序由下至上。

(10)全断面注浆加固主要为区间左、右线穿越铁路铁路范围前后各 15m 进行全断面注浆加固；盾尾脱出管片 5 环左右开始进行全断面注浆，注浆范围为管片外径往外 2m；在穿越铁路范围采用特殊环管片，在管片原有 6 个吊装孔增加 12 个注浆孔；全断面注浆采用 42.5 普通硅酸盐水泥单液浆，水灰比 0.8，注浆量为加固体体积的 20%～25% 之间，在管片每个预留孔均匀注入。

(11)控制地层损失量控制主要为在盾构掘进过程中根据地面深层监测点数据及时反映土层损失量(控制在 0.5% 以内)，在推进过程中应保持盾构切口处有微小隆起以抵消后期沉降；盾构掘进后应及时通过同步注浆及二次注浆填充盾尾间隙，严格控制土层损失量，力争将地层损失控制在 0.5% 范围内。

(12)信息化施工主要为在穿越阶段，施工单位

24 小时安排井下、地面值班人员，通过座机电话随时向盾构作业面反馈最及时的地面信息，同时盾构机驾驶室的电话保证 24 小时畅通，监测人员昼夜进行铁路变形观测，及时观察铁路路基及轨道的变形情况。及时准确将监测数据汇总给施工技术部门。

（13）盾构机穿越前的检查、维修主要为盾构穿越前严格按照《盾构机验收大纲》逐条检查、核对，对盾构机进行一次全面的检查、保养和维修。

2.7 行车限速施工方案

盾构区间下穿京广铁路股道群影响范围前后各 1.5km 范围为行车限速慢行范围。

区间下穿铁路股道群距国铁汉口站约 1.5km。在盾构机掘进通过铁路前，向铁路部门充分了解铁路行车计划及间隔时间，做好合理的具体施工筹划，在盾构机穿越期间，与铁路部门协商将列车时速控制在 45km/h 之内，缓慢行驶，降低列车冲击动载减小沉降。在盾构穿越铁路轨道群期间由专人负责防护、指挥。

2.8 施工技术保证措施

（1）施工前，组织相关人员，对铁路建构筑物进行详细施工调查；制订切实可行穿越施工方案，提前进行穿越铁路范围内地层加固。

（2）穿越过程中严格控制盾构土仓压力、推进速度、刀盘扭矩、土仓压力、注浆数量；保持开挖面的平衡和稳定。合理控制推进速度、出土量。推进中调整好盾构机的掘进姿态，以降低对周围土体的扰动；坚持"勤监测、勤纠偏、小纠偏"的原则，尽量实现盾构的平缓推进；严禁大幅度纠偏，造成过大超挖和对周围土层的扰动。

（3）严格按控制注浆压力和注浆量，在同步注浆的同时，跟踪施工监测信息及时补注二次双液浆，利用其速凝的特点迅速稳定软弱围岩。

（4）采用信息化，对地面实时监控，根据监测值来调整和优化盾构机掘进参数。加强盾构机掘进监测管理：地表沉降监测、轨道变形监测、地下管线变形监测、隧道收敛监测等；

（5）提前做好事故应急预案，现场配备足够的抢救材料、设备，定期组织应急演练。

3 穿越铁路监测方案和监测数据分析

3.1 监测目的和原则

3.1.1 监测目的

（1）施工期间对地表、盾构掘进参数进行监测和监控，有效地指导施工，保证行车安全。

（2）为保证既有铁路的行车安全和正常运营，在盾构穿越铁路期间，必须对既有线路实施全天 24 小时的监控[4,5]，对主要监控项目（地层及地表位移）中部分有代表性的测点采用远距离自动化监测系统，配备计算机及相关软件以便及时处理量测数据，并在数据处理系统中采用设置警戒值自动报警系统，以保证对线路的全程监控。

3.1.2 监测原则

（1）对于盾构穿越铁路对线路影响较大的地段，实行重点监控量测，增加量测点数和量测频率。

（2）及时计算、分析和整理数据，并把分析结果以图表的形式及时上报各有关单位，以便指导施工。

3.2 监测项目及手段

（1）对铁路的监测项目包括铁路线路轨面及地表沉降、铁路线路地层沉降、接触网杆的沉降等，采用全自动化监测系统和人工监测进行。

（2）对铁路桥的的监测项目包括沉降监测、裂缝观测等，采用全站仪和千分尺。

3.3 监测要求

3.3.1 监测布点要求

（1）地面沉降监测点需布置纵向（沿轴线）剖面监测点和横剖面监测点，纵向（沿轴线）剖面监测点的布设一般需保证盾构顶部始终有监测点在监测，所以监测沿轴线方向监测点间距一般小于盾构长度，故取每隔 5 ~ 6.5m 在沿轴线方向布置一个测点。

（2）监测横剖面：每隔 10 ~ 15m 布置一个横剖面，在横剖面上从盾构轴线由中心向两侧由近到远，按测点间距为 2m；布设的范围为盾构外径的 2 ~ 3倍，即线路左右各 12 ~ 18m 范围。

（3）对于轨面的监测，在每根轨道上沿轨道方向每 3m 设一个观测点，测点用红油漆标记，并统一编号。监测点布点示意图如图 4 所示。

3.3.2 监测频率要求

盾构掘进时，地面监测频率为 1 次/10min。施工监测时要与铁路工务段人员一起进行监测。对穿越节点的监测应在穿越完成后一段时间内待地面沉降稳定后方可结束。

3.4 监测数据分析

3.4.1 京广铁路周边地表沉降

盾构穿越京广线区域周边地表共布设了 9 个监

测点来反应其监测数据的变化情况，并进行统计分析，具体取 2016 年 3 月 9 号到 2016 年 3 月 19 日这一穿越时间段的监测数据来做汇总。相应的监测点地表累计沉降变化情况分别如图 5 所示。

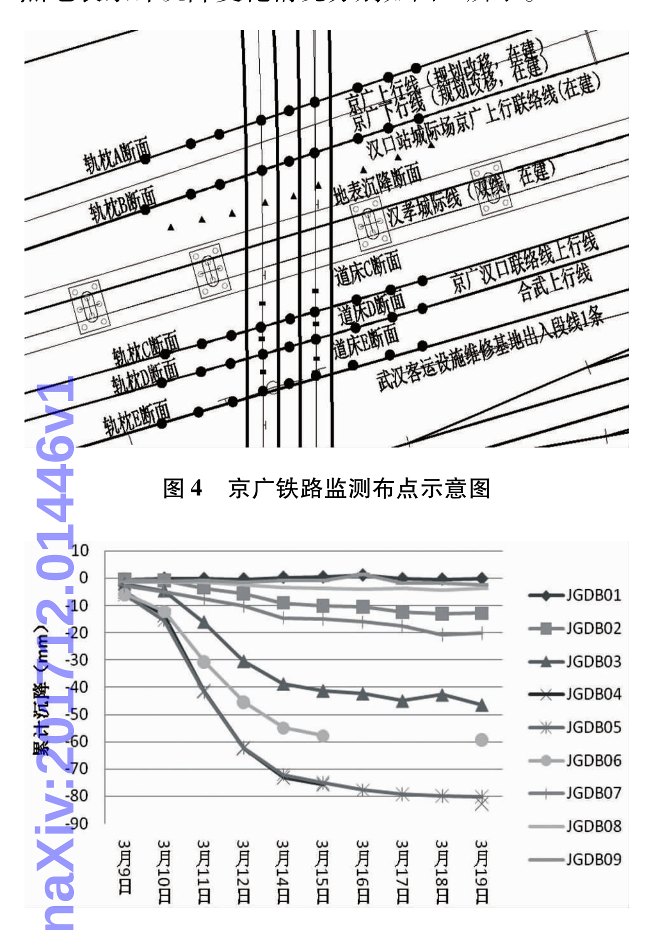


图 4　京广铁路监测布点示意图

图 5　京广铁路周边地表累计沉降时序曲线

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天，通过数据反映的情况，各个监测点的累计沉降量呈现逐渐增加状态，且越过负绝对临界值(24mm)。由于盾构初期穿越期间盾构机盾尾出现渗漏情况，造成盾构穿越时地表沉降较大，但通过及时进行处理，沉降点变化速率很快稳定，但穿越过程中对地面沉降影响较大。

3.4.2　京广铁路轨枕沉降

盾构穿越京广线区域在轨枕上共布设了 7 个监测断面来反应其监测数据的变化情况，并进行统计分析，本文选取其中 A ~ E 断面人工监测数据来进行分析，具体取 2016 年 3 月 9 号到 2016 年 3 月 19 日这一穿越时间段的监测数据来做汇总。相应的 A ~ E监测断面点累计沉降变化情况分别如图6 ~ 10 所示。

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天，通过数据反映的情况，A 监测断面点的累计沉降量波动较大，且越过正负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对轨枕影响较大。

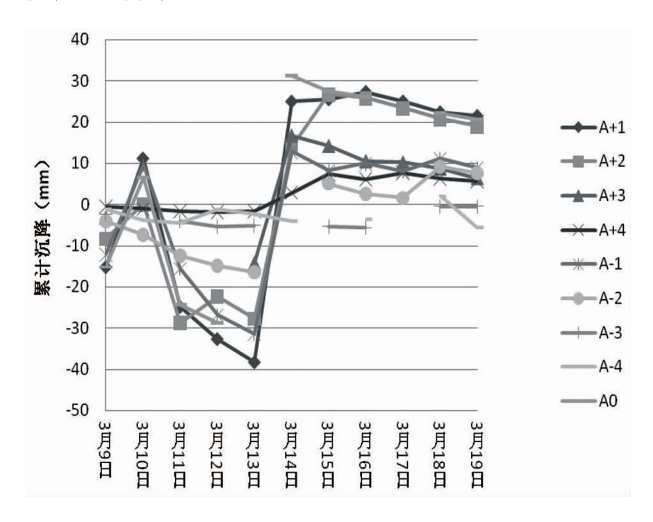


图 6　京广铁路轨枕 A 断面累计沉降时序曲线

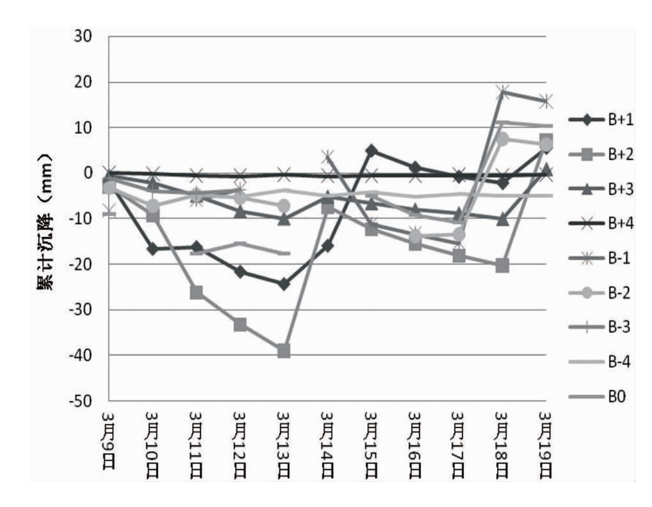


图 7　京广铁路轨枕 B 断面累计沉降时序曲线

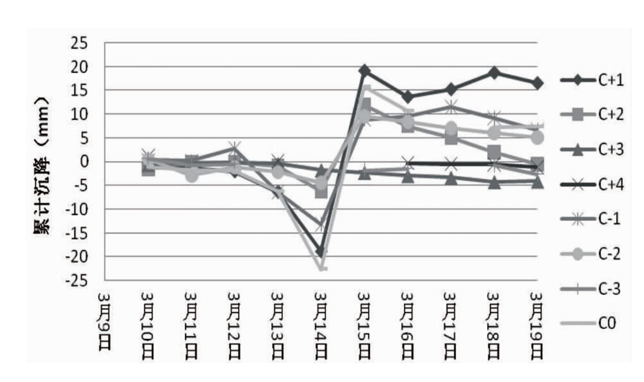


图 8　京广铁路轨枕 C 断面累计沉降时序曲线

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天，通过数据反映的情况，B 监测断面点的累计沉降量波动较

大,且越过正负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对轨枕影响较大。

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天,通过数据反映的情况,C 监测断面点的累计沉降量波动较大,且越过正负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对轨枕影响较大。

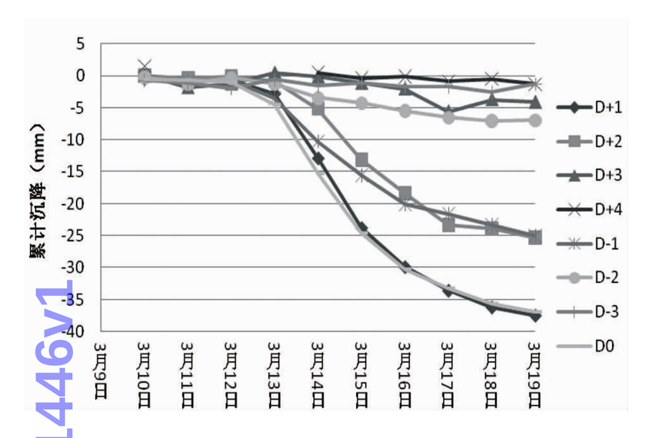


图 9　京广铁路轨枕 D 断面累计沉降时序曲线

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天,通过数据反映的情况,D 监测断面点的累计沉降量较大,主要为下沉,且越过正负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对轨枕影响较大。

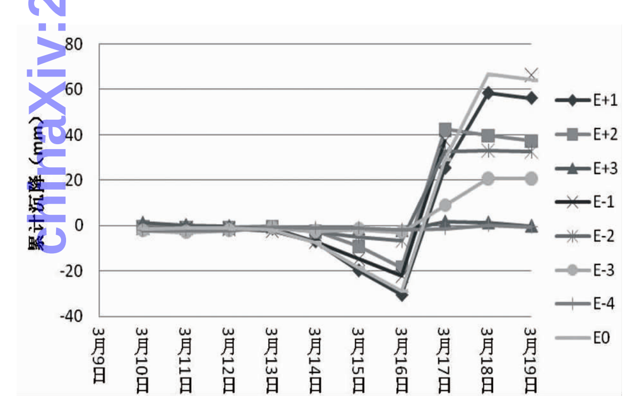


图 10　京广铁路轨枕 E 断面累计沉降时序曲线

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天,通过数据反映的情况,E 监测断面点的累计沉降量波动较大,且越过正负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对轨枕影响较大。

3.4.3　京广铁路道床沉降

盾构穿越京广线区域在道床上共布设了 7 个监测断面来反应其监测数据的变化情况,并进行统计分析,本文选取股道群中部 C ~ E 断面人工监测数据来进行分析,具体取 2016 年 3 月 10 号到 2016 年 3 月 19 日这一穿越时间段的监测数据来做汇总。相应的 C ~ E 监测断面点累计沉降变化情况分别如图 11 ~ 13 所示。

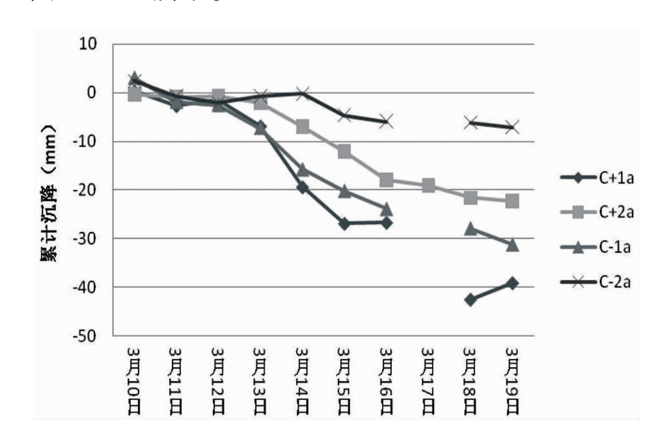


图 11　京广铁路道床 C 断面累计沉降时序曲线

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天,通过数据反映的情况,各个监测断面点的累计沉降量较大,且越过负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对道床影响较大。

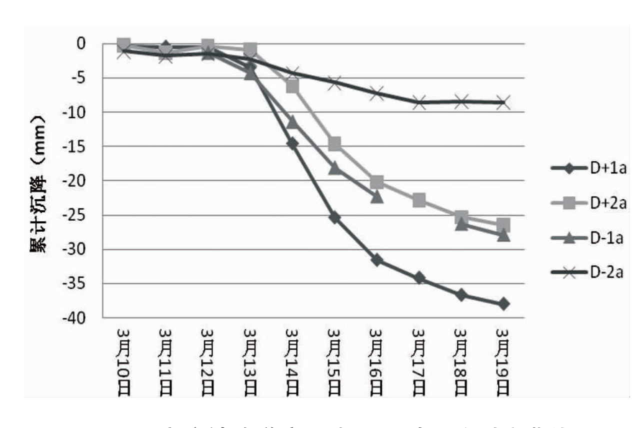


图 12　京广铁路道床 D 断面累计沉降时序曲线

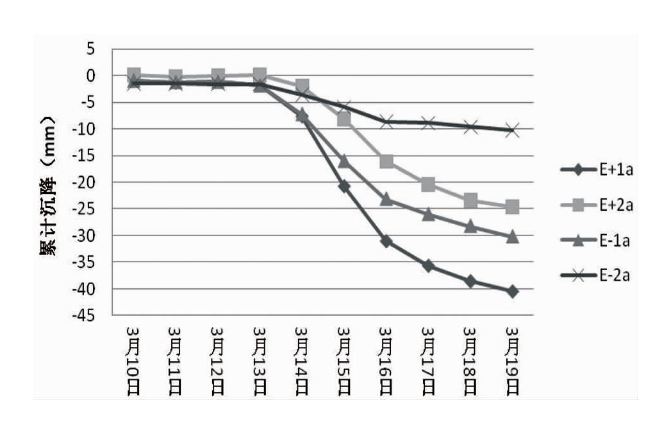


图 13　京广铁路道床 E 断面累计沉降时序曲线

此时间段的监测频率大致为 1 次/1 天,通过数

据反映的情况,各个监测断面点的累计沉降量较大,且越过负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对道床影响较大。

此时间段的监测频率大致为1次/1天,通过数据反映的情况,各个监测断面点的累计沉降量较大,且越过负绝对临界值(8mm)。穿越过程中对道床影响较大。

4 结论

本文通过对某城市地铁区间隧道盾构穿越京广线股道群控制措施及分析,得出以下几点主要结论:

(1)盾构隧道穿越国铁前,应积极与铁路有关部门协调,充分做好穿越铁路前的准备和保护工作,编制完善的施工组织方案和应急预案。

(2)穿越前应对盾构机进行检修,避免中间停机、漏浆或注浆系统堵管等情况发生,保证盾构机能够连续匀速推进。

(3)制定合理的监测方案,保证盾构穿越期间有准确的变形数据,信息化指导施工。

(4)地铁盾构穿越既有铁路线,虽然采取了多种控制措施,但是实际施工中会有相关措施施工达不到预期效果(本区间穿越地层主要为粉砂层,埋深较深,加固效果没有达到预期),会造成穿越期间对铁路有影响。特别是在发生突发情况后,会加剧穿越期间对铁路的影响。

参考文献

[1] 郑向红. 盾构隧道下穿既有城市铁路施工技术[J]. 铁道标准设计, 2008(12): 105-107.

[2] 张舵. 地铁盾构区间穿越既有铁路技术措施研究[J]. 铁道标准设计, 2013(2): 81-84.

[3] 彭智勇. 盾构隧道下穿既有铁路站场地基加固研究[J]. 北京交通大学, 2008.

[4] 肖立, 张庆贺. 盾构长距离下穿铁路股道引起的地表沉降分析[J]. 上海交通大学学报, 2011(5): 672-676.

[5] 连长江. 城市地铁隧道盾构施工产生的地层沉降分析[J]. 广东建材, 2007(2): 46-47.

Analysis of the Impact of Construction Control for Subway Shield Tunneling through the Traveling Track Groups in the Beijing – Guangzhou Line

Zhang Lian[1], Liu Baolin[2], Zhou Ying[2]

(1. *Wuhan Metro Group*, *Wuhan* 430030, *China*;
2. *Institute of Construction Management*, *School of Civil Engineering & Mechanics*, *Huazhong University of Science and Technology*, *Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: Research Purpose: With the construction and development of urban subway, the problems emerge during the metro construction when the shield tunnel traveling existing lines increased. In order to explore the influence when the shield tunnel traveling the operating line, this paper discussed different control measures based on the data recorded during the metro construction in a city and made a concrete analysis of each measure according to the deformation. Research Conclusion: To reduce the effect on the operating line when the shield tunnel traveling track group of the Beijing-Guangzhou Line, the paper made a concrete analysis of settlements of construction area. The study found that although the settlements of ground, ballast and the sleepers is higher than usual, the operation safety was ensured with the help of several control measures.

Key Words: Shield Tunnel; The Beijing-Guangzhou Line; Metro Construction; Control Measures; Monitoring